

УДК 621.311

В. Г. Ягуп, докт. техн. наук,
В. Ю. Истомин, магистрант
*Харьковская национальная академия
 городского хозяйства, т. 707-31-17*

Е. В. Ягуп, канд. техн. наук,
*Харьковская государственная
 академия железнодорожного
 транспорта*

ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Одной из наиболее распространенных типовых задач при проектировании электрических сетей является расчет установившегося режима сети [1, 2]. Эти расчеты составляют существенную часть общего полного исследования электрических сетей. Они дают возможность выбрать топологию сети, параметры элементов, составляющих сеть, а также проанализировать экономичность режимов и выбрать элементы защиты от аварийных режимов.

Поэтому при обучении студентов электроэнергетических специальностей необходимо обеспечить их удобным компьютерным инструментарием для проведения указанных расчетов. Имеющиеся промышленные разработки подобных программ характеризуются большими объемами сопроводительной информации, а кроме того труднодоступностью. Для решения учебных задач необходимы пакеты, отличающиеся простой интерфейса, наглядностью и отсутствием избыточности функций и документации.

В настоящей статье рассматривается создание пакета компьютерных программ для анализа установившихся процессов в электрических системах.

В разработанном пакете программ рассматривается электрическая сеть, представления в виде эквивалентной схемы замещения с помощью двухполусных элементов. Для ввода информации сети в компьютер целесообразно представить эквивалентную схему в виде ориентированного графа, ребра которого направлены в соответствии с принятыми положительными направлениями токов.

В качестве исходных данных для расчета применяется информация о топологии сети, параметрах ее элементов, в том числе сопротивления или проводимости элементов, а также задающие величины источников напряжения и тока. Эти величины вводятся в виде комплексных чисел, которые могут быть представлены в необходимой рациональной форме и преобразованы в любую удобную для пользователя форму. Для ввода информации в виде соответствующего списка используется подпрограмма, позволяющая вводить информацию с клавиатуры компьютера, записывать эту информацию в файл, и в дальнейшем считывать ее из текстового файла. Далее по исходной информации с помощью специальных подпрограмм формируются топологические матрицы и уравнения по методу узловых напряжений. Этот метод рационально применять, когда эквивалентная схема содержит лишь источники тока, а в задачах электрических систем, как правило, присутствуют источники напряжения, отображающие центры питания сети [3, 4]. Поэтому предусмотрены процедуры различных вариантов преобразований схемы замещения к рациональной форме.

Источники напряжения в эквивалентных расчетных схемах замещения электрических систем присутствуют обычно без последовательно соединенных с ними пассивных элементов. Это затрудняет преобразование таких ветвей с источниками напряжения к эквивалентным ветвям с источниками тока. Непосредственное преобразование в этом случае оказывается невозможным. Рассмотрен случай преобразования, предложенный в [5], который основан на переносе источника напряжения в ветви, находящиеся за одним из узлов, к которому присоединен источник напряжения. Если к этому узлу присоединено несколько пассивных ветвей сети, то переносимый источник напряжения размножается и оказывается в каждой из этих пассивных ветвей. В дальнейшем это приводит к появлению соответствующего числа эквивалентных источников тока. Указанные обстоятельства составляют слабую сторону такого подхода. Кроме реализации такого метода предложен метод введения последовательно с источником напряжения двух фиктивных резисторов. Сопротивления этих резисторов принимаются равными по абсолютной величине и противоположными по знакам. С одним из этих резисторов и осуществляется преобразование источника напряжения в эквивалентный источник тока. Второй резистор участвует как элемент сети, компенсирующий энергию первого резистора. В таком случае не требуется переносить источник напряжения, и топологическое преобразование расчетной схемы сопровождается введением двух дополнительных узлов, напряжения которых не принимаются во внимание в окончательных результатах расчетов сети.

Уравнения по методу узловых напряжений формируются с учетом комплексного характера величин всех параметров электрической сети. Для решения системы она предварительно преобразуется к форме уравнений с действительными величинами. Для решения уравнений состояний электрической сети предусмотрены процедуры реализующие различные численные методы: метод Гаусса, метод обратной матрицы, итерационные методы.

После вычисления комплексов узловых напряжений рассчитываются токи и мощности элементов и проверяется выполнение закона баланса мощностей.

Комплекс программ реализован на алгоритмическом языке Pascal в системе Delphi, однако он легко может быть реализован в любой иной системе программирования благодаря использованию библиотек динамической загрузки. Вывод результатов осуществляется в текстовые файлы, которые могут содержать не только конечные результаты, но и информацию о промежуточных операциях, что позволяет контролировать ход вычислений и представляет интерес при решении учебных задач студентами.

С помощью предложенного пакета программ было решено несколько десятков тестовых задач, что позволило сделать вывод о высокой точности и надежности работы пакета в целом.

В качестве примера использования пакета программ для анализа установившихся режимов электрических систем представлена задача вычисления емкостей симметрирующих конденсаторов, включенных в треугольник параллельно несимметричной трехфазной нагрузке. Расчетная схема показана на рис.1. Здесь трехфазная симметричная система напряжений питающей сети через линию электропередачи, представленную резистивно-индуктивными эквивалентами, питает несимметричную трехфазную нагрузку.

Здесь e_a, e_b, e_c – трехфазная система источников питания неограниченной мощности;

$R_a = R_b = R_c$ – активные сопротивления линии электропередачи;

$L_a = L_b = L_c$ – индуктивности линии электропередачи;

R_{na}, R_{nb}, R_{nc} – активные сопротивления нагрузки;

L_{na}, L_{nb}, L_{nc} – индуктивности нагрузки;

C_{ab}, C_{bc}, C_{ca} – компенсирующие конденсаторы.

Поскольку в общем случае нагрузка является несимметричной, то

$$R_{na} \neq R_{nb}, R_{nb} \neq R_{nc}, R_{nc} \neq R_{na};$$

$$L_{na} \neq L_{nb}, L_{nb} \neq L_{nc}, L_{nc} \neq L_{na},$$

и для компенсирующих конденсаторов справедливо также соответствующее неравенство

$$C_{ab} \neq C_{bc}, C_{bc} \neq C_{ca}, C_{ca} \neq C_{ab}.$$

Ввиду несимметрии системы, она не может рассматриваться пофазно и должна анализироваться в полном объеме.

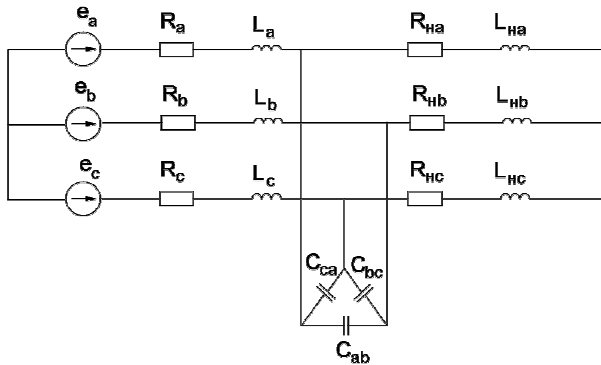


Рис.1

Обозначим:

$$z_a = R_a + j\omega L_a; z_b = R_b + j\omega L_b; z_c = R_c + j\omega L_c;$$

$$z_{na} = R_{na} + j\omega L_{na}; z_{nb} = R_{nb} + j\omega L_{nb}; z_{nc} = R_{nc} + j\omega L_{nc};$$

$$z_{ab} = \frac{1}{j\omega C_{ab}}; z_{bc} = \frac{1}{j\omega C_{bc}}; z_{ca} = \frac{1}{j\omega C_{ca}}.$$

Орграф с выделенным деревом (сплошные жирные линии) приведен на рис. 2.

Параметры схемы:

$$R_a = R_b = R_c = 0,1 \text{ Ом};$$

$$L_a = L_b = L_c = 0,001 \text{ Гн};$$

$$R_{na} = 0,7 \text{ Ом}; L_{na} = 0,005 \text{ Гн}; R_{nb} = 1 \text{ Ом}; L_{nb} = 0,01 \text{ Гн};$$

$$R_{nc} = 2 \text{ Ом}; L_{nc} = 0,04 \text{ Гн};$$

$$e_a = 100 \sin \omega t; e_b = 100 \sin (\omega t + \frac{4\pi}{3}); e_c = 100 \sin (\omega t + \frac{2\pi}{3});$$

$$\omega = 2\pi f = 100\pi.$$

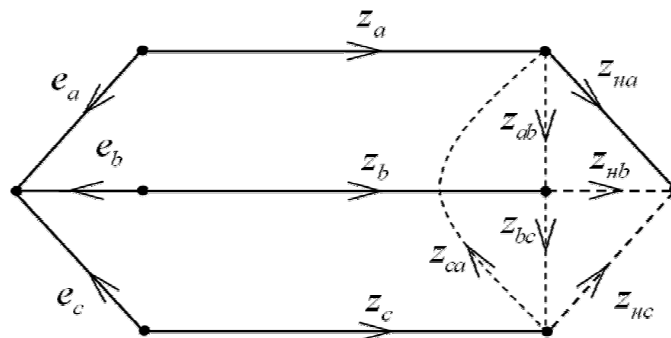


Рис.2

Для такой несимметричной схемы были рассчитаны точные значения симметрирующих конденсаторов, соответствующие следующим значениям их сопротивлений:

$$Z_{ab}=5,6625; Z_{bc}=17,459; Z_{ca}=92,358.$$

Для нахождения этих значений было проведено решение задачи обобщенными методами в постановке ее как задачи оптимизации [6]. В качестве целевой функции используется шаровая метрика, составленная из реактивных мощностей, потребляемых источниками напряжения. Параметры оптимизации представлены комплексными сопротивлениями симметрирующих конденсаторов. Для вычислительной процедуры использовались методы многомерного деформируемого симплекса и метод сопряженных градиентов.

Файл кодировки симметрированной схемы приведен на рис.3.

```

7
9
3
0
Z 1 4 1.000E-0001 3.141592E-0001
Z 2 5 1.000E-0001 3.141592E-0001
Z 3 6 1.000E-0001 3.141592E-0001
Z 4 7 7.000E-0001 1.570796E+0000
Z 5 7 1.000E+0000 3.141592E+0000
Z 6 7 2.000E+0000 1.256637E+0001
Z 4 5 0.0 -5.6625685
Z 5 6 0.0 -17.45906
Z 6 4 0.0 -92.35818
E 1 0 1.000E+0002 0.000E+0000
E 2 0 -5.000E+0001 -8.660254E+0001
E 3 0 -5.000E+0001 8.660254E+0001

```

Рис.3

Здесь указаны количество узлов, ребер, источников напряжения и тока. Затем кодируются начальным символом Z пассивные элементы, для которых указываются номера узлов, к которым присоединен элемент, и комплексные сопротивления в виде действительной и мнимой частей. Последние три строки отражают топологию и комплексные задающие величины источников напряжения. Результаты анализа приведены в таблице

Таблица

Величина	Несимметричный режим	Симметрированный режим
V_1	100	100
V_2	-50-j86,60254	-50-j86,60254
V_3	-50+j86,60254	-50+j86,60254
V_4	90,231-j3,518	99,22459-j2,436006
V_5	-42,040-j80,194	-51,72193-j84,71301
V_6	-48,190+j83,712	-47,50265+j87,149022
V_7	37,554-j16,109	39,9367-j16,14413
i_{E1}	-19,156+j24,999	-7,754050+j0,0000031
i_{E2}	25,844-j17,109	3,8770284+j6,715197
i_{E3}	-6,6892-j7,8896	3,8770284-j6,715197

Здесь использовалась программа, в которой в качестве искоемых переменных используются напряжения узлов относительно общего узла источников напряжения и токи источников напряжения.

Из сопоставления результатов анализа видно, что токи источников напряжения благодаря установке симметрирующих конденсаторов выровнялись и значительно уменьшились в сравнении с несимметричным режимом.

Выводы. Разработанный пакет компьютерных программ для анализа установившихся процессов в электрических системах использует метод узловых потенциалов в различных модификациях, касающихся способа формирования расчетных матриц. Тестирование программ на нескольких десятках схем показало работоспособность пакета, высокую точность и устойчивость вычислительных процедур.

Список литературы

1. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики./ под ред. В. А. Веникова. – М.: ВШ, 1981 – 288 с.
2. Буслов Н. В., Винославский В. Н., Денисенко Г. И., Перхач В. С. Электрические системы и сети. – Киев: ВШ, 1986. – 584 с.
3. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівське політехнік", 2007. – 488 с.
4. Романюк Ю. Ф. Електричні системи та мережі. – Київ: Знання, 2007. – 292 с.
5. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989.- 592 с.
6. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации. – Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика», вип. 11 (186). – Донецьк, 2011. – с. 449-454.

ПАКЕТ ПРОГРАМ ДЛЯ АНАЛІЗУ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

В. Г. Ягуп, В. Ю. Істомін, К. В. Ягуп

Запропонований пакет програм для аналізу усталених режимів в електричних колах, в якому враховуються варіанти лінійного і нелінійного навантаження

PROGRAM PACKAGE FOR ANALYSIS STEADY STATES OF POWER SYSTEMS

V. Yagup, V. Yu Istomin, K. V. Yagup

Program package for steady states analysis of power systems is introduced. Linear and nonlinear loading are considered in computational procedures.